بررسی اثر آهک و نانوآهک بر ویژگی‌های تراکمی و مقاومتی ماسه ساحلی چالوس*

مقاله علمی – پژوهشی

رضا رضوانی توچاهی[۱] میلاد عزیزی[۲] پژمان نوپارس[۳] علی نبی زاده[٤]

چکیده *خاک به‌عنوان لایهٔ سطحی زمین و بستر سازه‌های عمرانی، از اهمّیت ویژه‌ای در توسعهٔ مناطق شهری برخوردار است. برخی از خاک‌ها، همچون ماسه ساحلی چالوس، به دلیل وجود رفتار نامناسب از قبیل ظرفیت باربری کم و تراکم‌پذیری زیاد، در زمرهٔ خاک‌های مساله‌دار قرار می‌گیرند. از جمله روش‌های مرسوم در بهسازی سطحی خاک، تثبیت با استفاده از مواد افزودنی مناسب است. در این پژوهش به بررسی اثر افزودن کربنات کلسیم (آهک) در ابعاد معمولی و نانو، بر ویژگی‌های مکانیکی ماسه مورد استفاده پرداخته می‌شود. بدین منظور پس از نمونه‌برداری این خاک از سواحل شهر چالوس، آهک و نانوآهک در درصدهای وزنی مختلف به آن افزوده شده و تحت آزمایش‌های تراکمی و مقاومتی قرار گرفتند. بر اساس نتایج این پژوهش، افزودن آهک در ابعاد معمولی و نانو، باعث بهبود ویژگی‌های تراکمی و مقاومتی شده، لیکن تأثیر نانوآهک به‌مراتب بیشتر است که این موضوع می‌تواند به علت تشدید و تسریع واکنش‌های شیمیایی رخداده بین عناصر موجود در خاک و کربنات کلسیم در ابعاد نانو باشد. همچنین با افزایش درصد آهک و نانوآهک در مخلوط، هم زاویهٔ اصطکاک و هم چسبندگی افزایش یافته، لیکن تأثیر مواد افزودنی بر چسبندگی مخلوط، چشمگیرتر است.*

واژه‌های کلیدی بهسازی خاک، آهک، نانوآهک، رفتار تراکمی، پارامترهای مقاومتی.

Evaluating the Effects of Lime and Nano-Lime on Compaction and Strength Properties of Chaloos Coastal Sand

R. Rezvani M. Azizi P. Nopars A. Nabizadeh

Abstract *Soil as a substrate of land and the foundation of civil structures is of particular importance in the development of urban areas. Some soils are classified as problematic soils due to their low mechanical resistance or high sensitivity to moisture changes, such as the Chalus coastal sand. Soil stabilization with suitable materials is one of the methods of soil improvement for problematic soils. The effect of calcium carbonate (i.e., lime) and nano-calcium carbonate (i.e., nano-lime) on the mechanical properties of the Chalus coastal sand is evaluated in this study. For this purpose, after sampling the soil from the coasts of Chalus city and conducting basic geotechnical experiments, the mixtures were prepared with different percentages of lime and nano-lime and compaction and strength tests were performed on the mixtures. The results showed that lime and nano-lime improved the mechanical properties of the soil material. However, the effect of nano-lime on the mechanical properties of Chalus sand is more significant compared to lime-sand mixtures. In addition, the increase in the lime and nano-lime content in soil mixtures resulted in an increase in the internal friction angle and cohesion.*

Key Words Soil Improvement, Lime, Nano-Lime, Compaction Properties, Strength Parameters, Bearing Capacity

* تاریخ دریافت مقاله ۹۸/۱۲/۱۳ و تاریخ پذیرش آن ۹۹/۳/۳۱ می‌باشد.

(۱) نویسندهٔ مسئول، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکدهٔ فنّی و مهندسی شرق گیلان، دانشگاه گیلان. **Email:** rezvani@guilan.ac.ir

(۲) کارشناس ارشد ژئوتکنیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تنکابن.

(۳) کارشناس ارشد ژئوتکنیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تنکابن.

(٤) استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی.

مقدّمه

کشور ایران در زمرهٔ کشورهایی قرار گرفته که دارای خاک‌های مسأله‌دار (خاک‌های نرم و شل، خاک‌های انبساطی، خاک‌های رمبنده یا فروریزشی و خاک‌دستی) است و در صورت عدم شناسایی این نوع خاک‌ها، اگر سازه‌ای روی آنها احداث شود، سازه احداث‌شده بنا به دلایل مختلف دچار مشکلات و ضرر و زیان خواهد شد. روش‌های مختلفی برای بهبود خواص و ویژگی‌های خاک وجود دارد که از آن جمله می‌توان به فرآیندهای مکانیکی نظیر تراکم، زهکشی به‌وسیلهٔ چاه‌های ماسه‌ای و تحکیم و فرآیندهای شیمیایی نظیر اصلاح و تثبیت یا استفاده از عناصر مسلح‌کننده همچون تسمه‌های فولادی، اشاره نمود. اضافه نمودن پاره‌ای از افزودنی‌ها به خاک، به‌عنوان یکی از روش‌های مؤثر در بهبود برخی از مشخصه‌های رفتاری خاک همواره مدنظر بوده است. افزودنی‌های مختلفی همچون سیمان، آهک، کلرید کلسیم، خاکستر بادی، قیر، انکلوزیون‌های پلیمری و... در مطالعات پژوهشگران مورد بررسی قرار گرفته است [1-4].

تثبیت خاک به روش شیمیایی، در مورد اغلب خاک‌ها، همچون خاک‌های ماسه‌ای ساحلی، مورد استفاده قرار می‌گیرد. این‌گونه خاک‌ها به دلیل شرایط محیطی، اغلب دارای سطحی صاف و دانه‌های گرد و ریز بوده و به همین دلیل دارای مقاومت کم و تراکم‌پذیری بالا می‌باشند، بنابراین بهسازی این نوع خاک‌ها برای مقابله با بارهای استاتیکی و دینامیکی اجتناب‌ناپذیر است [5]. خاک مورد استفاده در این پژوهش نیز منشأیی دریایی دارد و بر اثر بارگذاری می‌تواند نشست‌های قابل توجّهی از خود نشان دهد. بخش قابل توجّهی از سواحل شمالی ایران، از این نوع خاک پوشیده شده و تعداد زیادی از مراکز جمعیتی و روستایی بر روی این نوع خاک بنا شده است. از همین رو بهسازی این نوع خاک اهمّیّت ویژه‌ای دارد.

در کنار انواع افزودنی‌های متداول، نانوذرات که دارای ویژگی‌های منحصربه‌فردی هستند، در مهندسی ژئوتکنیک کمتر مورد توجّه قرار گرفته‌اند. نانو فناوری شاخه‌ای از علم مهندسی است که دربارهٔ ذراتی بحث می‌کند که اندازهٔ آنها کمتر از ۱۰۰ نانومتر است. ذرات با اندازهٔ نانومتر در مقایسه با ذرات با اندازهٔ بزرگ‌تر، رفتارهای بسیار متفاوت، با ویژگی‌های ارتقاءیافته، از خود نشان می‌دهند [6-10]. نانوذرات به دلیل داشتن ویژگی‌هایی همچون سطح ویژهٔ بالا، بارهای سطحی و منافذ در ابعاد نانو، درصورتی‌که به مقدار بسیار کمی هم در خاک وجود داشته باشند، می‌توانند ویژگی‌های مهندسی و رفتار فیزیکی و شیمیایی خاک را تحت تأثیر قرار دهند.

پژوهش‌های بسیاری در زمینهٔ استفاده از انواع مواد افزودنی (در ابعاد طبیعی و نانو)، برای بهبود رفتار مصالح خاکی انجام شده است. حائری و همکاران [11] با افزودن سه مادهٔ چسباننده مختلف شامل گچ، آهک و سیمان پرتلند به ماسهٔ شن‌دار، به بررسی رفتار مقاومتی مخلوط با استفاده از نتایج آزمایش‌های سه محوری پرداختند. نتایج نشان داد که نمونه‌های ساخته‌شده با مخلوط خاک و گچ دارای بیشترین رفتار شکنندگی نسبت به نمونه‌های ساخته‌شده با دیگر مواد افزودنی بوده است. همچنین افزودن ٤/٥٪ آهک باعث شد که چسبندگی خاک حدود ۱۰ و زاویهٔ اصطکاک حدود ۱/۱ برابر افزایش یابد. در پژوهشی دیگر، اصغری و همکاران [12] با انجام آزمایش‌های سه محوری بر روی خاک‌های غیرسیمانه و سیمانه‌شده با آهک نشان دادند که با افزایش میزان سیمانه‌شدگی، چسبندگی نمونه‌ها بیشتر شده و همچنین پوش گسیختگی در خاک‌های سیمانه‌شده به‌صورت منحنی است. در سال ۱۹۹۳، یونکورا و میوا [13] برای افزایش مقاومت فشاری ماسه از نانوذرات سیلیس استفاده کردند. آنها گزارش کردند که با افزودن ۳۳ درصد وزنی نانوسیلیس به خاک، مقاومت خاک بعد از حدود ۱۰۰۰ روز، ۳/۵ برابر شد. کاهش نفوذپذیری و جذب سطحی فلزات به‌وسیلهٔ تثبیت خاک با نانوسیلیس توسط نول و همکاران [14] نیز بیان گردیده است. باترون و همکاران [15] بیان کردند که نفوذپذیری مصالح مخلوط شده با نانوسیلیس می‌تواند مشابه رُس با نفوذپذیری کم باشد. نتیجهٔ پژوهش‌ها بر روی چگونگی تأثیر نانوسیلیس بر ویژگی‌های مخلوط خاک-سیمان نشان می‌دهد که افزودن

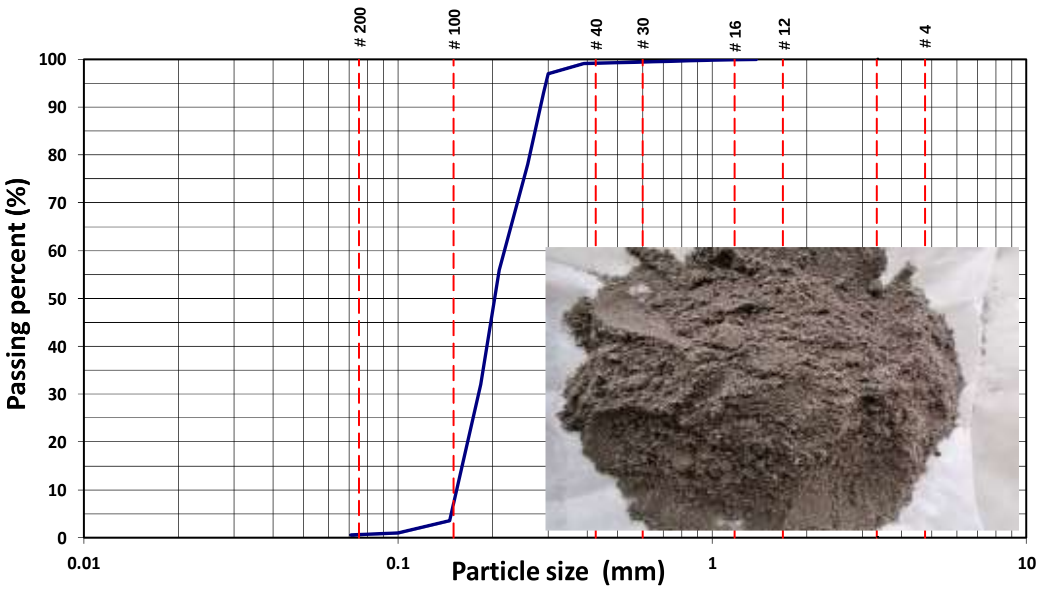
نانوسیلیس تا ۳۰٪ وزن سیمان، باعث افزایش ۱۰۰ درصدی مقاومت فشاری، نسبت به نمونه‌های فاقد نانوسیلیس می‌شود [١٦]. بهمنی و همکاران [17] نیز بیان کردند که با افزودن نانوسیلیس تا ۰/٤٪ وزن خاک، مقاومت فشاری حدود ۸۰٪ افزایش می‌یابد.

نتایج برخی از پژوهش‌ها نشان می‌دهد که افزودن نانوذرات از یک حدی بیشتر، کاهش مقاومت برشی خاک را به همراه خواهد داشت. برخی از محقّقین مقدار ۸٪ وزن خاک را به‌عنوان درصد بهینۀ نانوسیلیس گزارش کرده‌اند [18,19]. بررسی تأثیر مواد نانو بر ماسه رس‌دار توسط محمّدزاده و همکاران [۲۰] در سال ۲۰۱۰ انجام گرفت. در این پژوهش خاک ماسه‌ای رس‌دار (با نسبت ۸۰٪ ماسه ساحلی انزلی و ۲۰٪ رس کائولینیت) با درصد-های وزنی مختلفی از نانورس (۰/۵، ۱ و ۲ درصد) مخلوط شده و تحت آزمایش قرار گرفتند. نتایج حاکی از آن بود که حضور ۱٪ نانو، باعث افزایش حد خمیری به مقدار ۳۸٪ و کاهش دامنۀ خمیری به مقدار ٤۰٪ می-گردد. نتایج مشابهی توسط عبدی‌نژاد و همکاران [۲۱] با افزودن نانوآهک به خاک رس مسأله‌دار گزارش شده است. آنها اعلام کردند که به ازای هر ۱٪ نانو آهک، حد خمیری خاک رس در حدود ۲٪ افزایش می‌یابد، درحالی‌که میزان افزایش این پارامتر برای افزودن هر ۱٪ آهک، حدود ۰/۹٪ است. ژانگ و همکاران [22] با افزودن مواد نانو به مصالح رسی بیان نمودند که حدود اتربرگ در این مصالح افزایش می‌یابد. بهبود خواص خاک رس با افزودن مواد نانو، توسط محقّقین مختلفی بیان شده است [25-23]. تاپیودیا و همکاران [26] به بررسی تأثیر نانوذرات دی کلریدکلسیم، اکسیدکلسیم، نیترات پتاسیم و بنتونیت بر ویژگی‌های خاک پرداختند. نتایج آنها نشان داد که استفاده از مواد افزودنی در ابعاد نانو، تأثیر بیشتری بر رفتار خاک دارد. مقاومت فشاری مخلوط رس و نانواکسید کلسیم، ۵۵٪ و مدول برشی مخلوط ماسه و نانواکسید کلسیم، بیش از ۱۰۰٪ افزایش داشته است. درنتیجۀ استفاده از نانوذرات، باعث کاهش پتانسیل وقوع روانگرایی در مصالح خاکی می‌گردد. احمدی [27] به بررسی آزمایشگاهی تأثیر نانومواد بر ویژگی‌های ماسه تثبیت‌شده با سیمان پرداخت. در این پژوهش سه نوع نانومواد شامل نانوسیلیس، نانوآلومینیوم و نانومنیزیم مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که حضور نانومواد باعث قفل‌وبست بیشتر مصالح خاکی و پر شدن منافذ بین دانه‌ای شده و افزایش سختی تا بیش از ۲۰٪ با افزودن ۱/۲٪ مواد نانو را به همراه خواهد داشت.

در این پژوهش سعی شده است با افزودن درصد-های مختلف از آهک و نانوآهک، به بررسی اثر آنها بر بهسازی ویژگی‌های خاک ماسه‌ای سواحل شهر چالوس پرداخته شود. همچنین با در نظر گرفتن درصد-های افزودنی تقریباً یکسان در حالت‌های آهک و نانوآهک، سعی شده است نحوۀ عملکرد این دو ماده در بهسازی خاک ماسه‌ای ساحلی مقایسه شده و تأثیر ابعاد ذرات افزودنی بر شدّت و چگونگی واکنش‌های شیمیایی بررسی شود. در انتها مقایسه‌ای بین نتایج حاصل‌شده در این مطالعه و پژوهش‌های پیشین انجام گرفته است.

مصالح مورد استفاده

در این پژوهش از خاک سواحل دریای خزر به‌عنوان مصالح خاکی استفاده شده است. بدین منظور خاک مورد نظر از سواحل شهرستان چالوس برداشت شده است. برای تعیین ویژگی‌های فیزیکی این ماسه، آزمایش‌های شاخص بر روی آن انجام گرفت. نمودار دانه‌بندی خاک در شکل (۱) نشان داده شده است. با استفاده از روش متحد (یونیفاید)، این خاک به‌صورت ماسه بد دانه‌بندی شده (SP) طبقه‌بندی می‌گردد. در جداول (۱) و (۲) برخی از مهم‌ترین مشخصات فیزیکی و مهندسی ماسۀ چالوس و نانوآهک مورد استفاده در این پژوهش، ارائه شده است.



شکل (۱): نمودار دانه‌بندی و تصویری از ماسه برداشت‌شده از ساحل چالوس

جدول (۱): ویژگی‌های فیزیکی ماسهٔ چالوس

مشخصات خاک	مقادیر
طبقه‌بندی متحد (یونیفاید)	SP
ضریب یکنواختی (C_u)*	۱/٤٤
ضریب انحناء (C_c)**	۰/۸٦
اندازهٔ مؤثر ذرات (D_{10}) (mm)	۰/۱۵۳
اندازهٔ متوسط ذرات (D_{50}) (mm)	۰/۲۰۵
چگالی ویژه (G_s)	۲/۷۰
نسبت منافذ حداقل (e_{min})	۰/۵۳
نسبت منافذ حداکثر (e_{max})	۰/۸۰
	* $C_u=D_{60}/D_{10}$ ** $C_c=D_{30}^2/(D_{60}*D_{10})$

جدول (۲): مشخصات نانوآهک مورد استفاده در پژوهش

مشخصات نانوآهک	مقادیر
اندازهٔ متوسط (nm)	٦۰
سطح ویژه (cm^2/gr)	٦۰–۸۰
درجهٔ ذوب (^{0c})	۸۲۵
درجهٔ خلوص (٪)	۹۹
pH	۸ – ۱۰/۵

آماده‌سازی نمونه‌ها

برای ارزیابی تأثیر افزودن آهک و نانوآهک بر روی ویژگی‌های تراکمی و مقاومتی، نمونه‌های خاک با درصدهای مختلف مواد افزودنی (شامل ۱، ۲، ۳، ٦ و ۹ درصد) ساخته‌شده و تحت آزمایش‌های پروکتور استاندارد و برش مستقیم قرار گرفتند. در این پژوهش از روش رسوب‌گذاری خشک برای آماده‌سازی نمونه‌های مخلوط خاک، آهک و نانوآهک استفاده گردید. بدین منظور، با توجّه به درصد وزنی افزودنی‌ها، مقادیر مناسب ماسه خشک‌شده در گرم‌خانه، آهک و نانوآهک توزین و در یک بطری ریخته شده و با چرخاندن و تکان دادن بطری به مدّت پنج دقیقه، سعی گردید تا ماسه و افزودنی-ها به‌صورت نسبی با یکدیگر مخلوط شوند. سپس مخلوط به‌دست‌آمده به همراه ۲ الی ۳٪ وزنی آب، در ظرفی لوله‌ای شکل از جنس پلکسی‌گلاس ریخته شد. با چرخش ۱۸۰ درجه‌ای ظرف، به‌صورت رفت و برگشتی و به مدّت ۲۰ دقیقه، ماسه و افزودنی کاملاً با هم مخلوط گردیدند.

برای انجام آزمایش تراکم، ۵ نمونه آماده‌شده به طریق فوق، به‌صورت جداگانه با وزن حدود ٤ کیلوگرم

آماده شده و به هرکدام رطوبت‌های مختلف (از ۵ الی ۲۰٪) اضافه گردید. تمامی نمونه‌های ساخته‌شده به مدّت ۲٤ ساعت داخل محفظه‌های پلاستیکی برای انجام واکنش‌های شیمیایی قرار داده شدند. پس‌ازآن بر روی هر نمونه، آزمایش پروکتور مطابق با استاندارد [28] انجام گرفت.

برای انجام آزمایش برش مستقیم [29] از دستگاه برش با ابعاد جعبهٔ ۳۰×٦۰×٦۰ میلی‌متر استفاده گردید. شایان یادآوری است که برای مقایسهٔ بهتر نتایج، شرایط اوّلیهٔ آزمایش برای تمامی نمونه‌های خاک طبیعی و تثبیت‌شده، ثابت در نظر گرفته شد. بدین منظور تمامی آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های با درصد رطوبت ۱۳٪ و وزن مخصوص ۱٦ کیلونیوتن بر مترمکعب انجام گرفت. برای هر آزمایش برش، ۳ نمونهٔ جدا با رطوبت ثابت ساخته‌شده و پس از ۲٤ ساعت نگهداری در محفظهٔ پلاستیکی، تحت آزمایش برش با اعمال بار قائم ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال قرار گرفتند. این توضیح لازم است که کلیهٔ آزمایش‌ها در شرایط کرنش کنترل شده و با سرعت ۱ میلی‌متر بر دقیقه انجام گرفت.

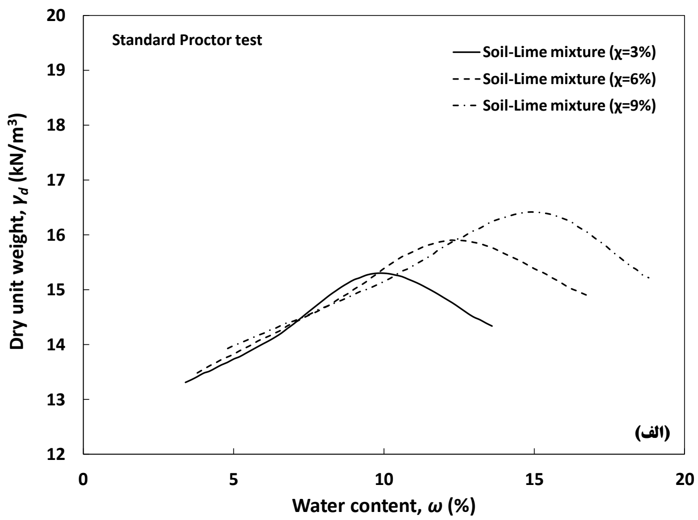
نتایج آزمایش‌ها

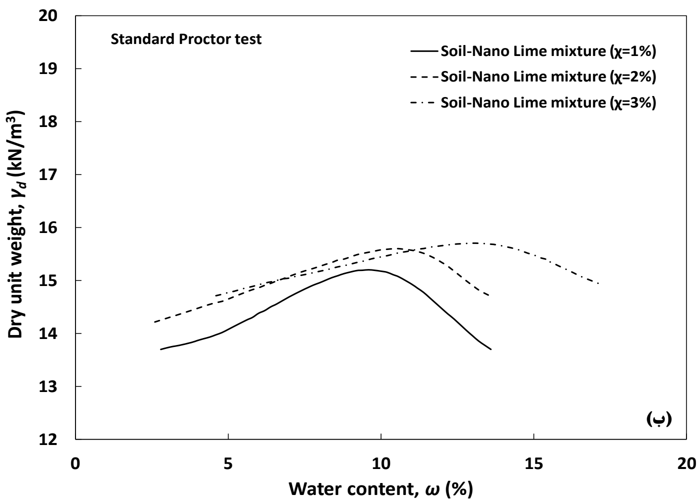
آزمایش پروکتور استاندارد

برای بررسی رفتار تراکمی ماسه تثبیت‌شده با آهک و نانوآهک، از جمله وزن مخصوص خشک حداکثر و رطوبت بهینه، آزمایش پروکتور استاندارد بر روی نمونه-های خاک بدون افزودنی و با افزودنی انجام گردید. بدین منظور مخلوط‌هایی با درصد افزودنی‌های مختلف (χ) شامل ۳٪، ٦٪ و ۹٪ آهک و ۱٪، ۲٪ و ۳٪ نانوآهک تحت آزمایش تراکم قرار گرفتند.

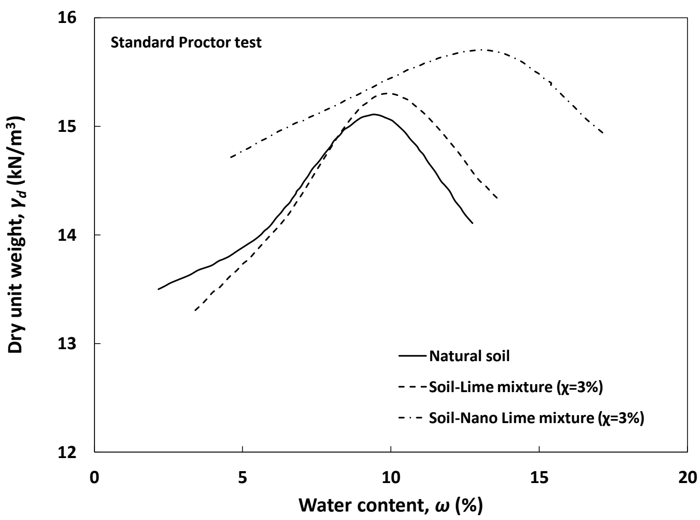
شکل (۲) منحنی‌های تراکم به‌دست‌آمده از این آزمایش را برای ماسه تثبیت‌شده با آهک و نانوآهک نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است در ابتدا با افزایش رطوبت، مقدار وزن مخصوص خشک نمونه‌ها افزایش پیدا کرده و پس از رسیدن به نقطهٔ حداکثر وزن مخصوص، با افزایش درصد رطوبت، میزان تراکم کاهش می‌یابد. این روند هم در نمونه‌های تثبیت‌شده با آهک و هم در نمونه‌های تثبیت‌شده با نانوآهک دیده می‌شود. بر اساس نتایج آزمایش‌ها، وزن مخصوص خشک حداکثر (γ_{dmax}) ماسهٔ ساحلی چالوس از مقدار ۱۵/۱ kN/m^3 در حالت طبیعی، به ۱٦/٤ kN/m^3 با افزودن ۹٪ آهک و ۱۵/۷ kN/m^3 با افزودن ۳٪ نانوآهک افزایش یافته است. با توجّه به ریزی ذرات آهک و نانو آهک، این مواد در بین منافذ خاک قرار گرفته و باعث توپرتر شدن مخلوط می‌گردند و همین امر منجر به افزایش وزن مخصوص می‌شود. همچنین با افزایش درصد مواد افزودنی، مقدار درصد رطوبت بهینه (ω_{opt}) نیز افزایش می‌یابد. درواقع با افزایش مقدار آهک و نانوآهک در مخلوط خاک-افزودنی، سطح ویژه مخلوط افزایش‌یافته و همین موضوع سبب می‌شود تا دانه‌های مخلوط به آب بیشتری برای جابه‌جایی نیاز داشته باشند. شایان یادآوری است که رطوبت بهینه در حالت ماسهٔ طبیعی، ۱۰/٤٪ بوده و این پارامتر با افزودن ۹٪ آهک، ۱٤/۹٪ و با افزودن ۳٪ نانوآهک، ۱۳/۲٪ می‌شود.

شکل (۳) منحنی‌های تراکم برای خاک ماسه‌ای در شرایط طبیعی (بدون افزودنی) و خاک تثبیت‌شده با ۳ درصد وزنی آهک و نانوآهک (χ=۳٪) را برای مقایسه نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است، مقدار وزن مخصوص خشک حداکثر ماسهٔ ساحلی با افزودن ۳٪ نانوآهک (۱۵/۷ کیلونیوتن بر مترمکعب) بیشتر از مقدار این پارامتر با افزودن ۳٪ آهک (۱۵/۳ کیلونیوتن بر مترمکعب) به‌دست‌آمده است. به‌عبارتی‌دیگر، تثبیت خاک با نانوآهک نتیجهٔ تراکمی بهتری را به دست می-دهد. همچنین درصد رطوبت بهینه خاک تثبیت‌شده با ۳٪ نانوآهک، ۱۳/۲٪ و مخلوط ماسه و ۳٪ آهک، ۱٤/۹٪ به‌دست‌آمده است. با توجّه به ریزی ذرات نانوآهک، سطح ویژهٔ این مصالح در درصدهای وزنی یکسان با آهک، بسیار بیشتر بوده و درنتیجه برای انجام فرآیندهای شیمیایی به مقدار آب بیشتری نیازمند است.





شکل (۲): منحنی‌های تراکم ماسه تثبیت‌شده با (الف) آهک و (ب) نانوآهک

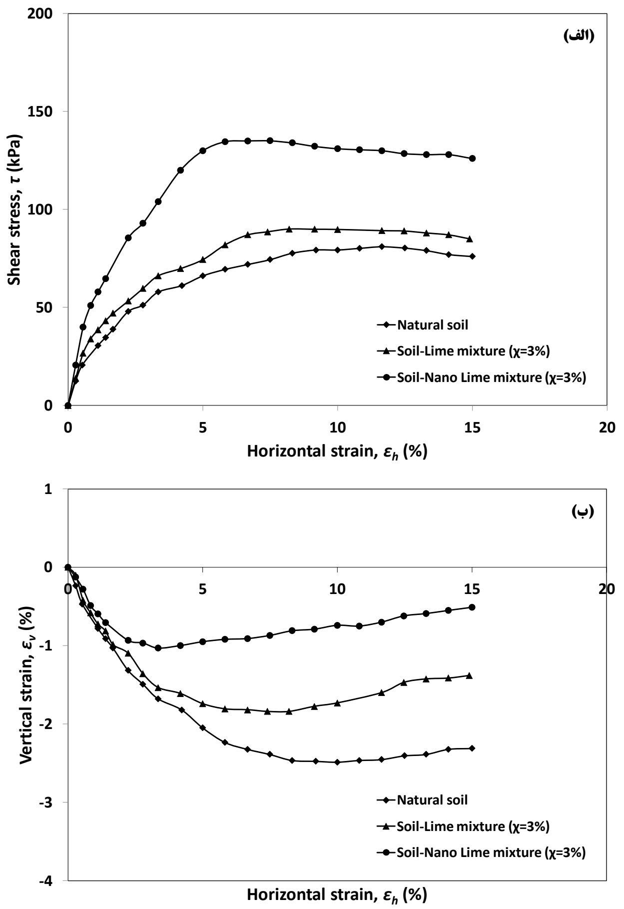


شکل (۳): منحنی‌های تراکم ماسهٔ طبیعی و تثبیت‌شده با ۳٪ آهک و نانوآهک

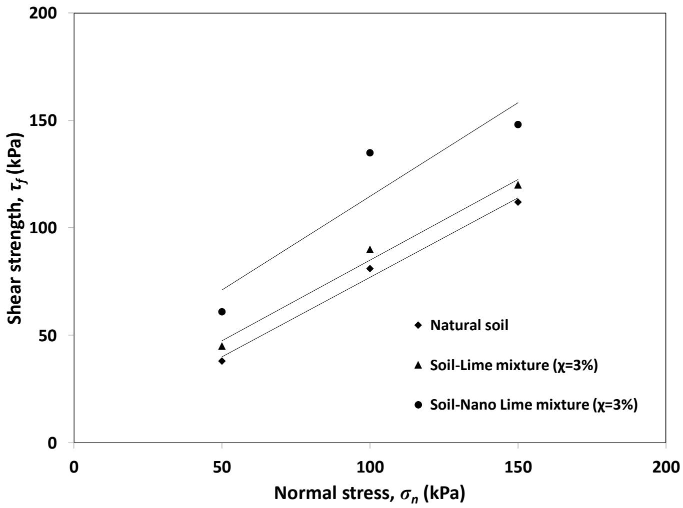
آزمایش برش مستقیم

در این پژوهش، بررسی پارامترهای مقاومتی خاک ماسه‌ای تثبیت‌شده با آهک و نانوآهک، به‌وسیلۀ آزمایش برش مستقیم انجام شد. بدین منظور نمونه‌های مختلف خاک ماسه‌ای مخلوط‌شده با درصدهای وزنی متفاوت آهک (χ=۳، ۶، ۹٪) و نانوآهک (χ=۱، ۲، ۳، ۶٪) آزمایش شدند.

شکل (۴) نتایج آزمایش‌های برش مستقیم برای ماسه طبیعی و تثبیت‌شده با ۳٪ مواد افزودنی را تحت تنش قائم ۱۰۰ کیلوپاسکال نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است، افزودن آهک و نانوآهک منجر به افزایش مقاومت برشی ماسه ساحلی شده است. وجود ذرات ریز آهک و نانوآهک در بین منافذ ماسه، باعث توپرتر شدن مخلوط و انتقال بهتر تنش بین دانه‌ها می‌شود. همچنین سیمانتاسیون ایجادشده در اثر واکنش‌های شیمیایی، افزایش سختی و کسب مقاومت سریع‌تر مخلوط را به دنبال خواهد داشت. با توجّه به تأثیر بیشتر ذرات آهک در مقیاس نانو بر شدت واکنش‌های شیمیایی، افزایش مقاومت در مخلوط خاک-نانوآهک نسبت به مخلوط خاک-آهک بیشتر بوده است. شکل (۴-ب) نشان می‌دهد که تمایل به اتساع در نمونه‌های مخلوط خاک تثبیت‌شده با آهک و نانوآهک بیشتر بوده که این موضوع به دلیل کلوخه‌شدن دانه‌های خاک و تشکیل دانه‌های زبرتر و گوشه‌دارتر نسبت به ماسه طبیعی است.



شکل (۴): نتایج آزمایش برش مستقیم برای ماسۀ طبیعی و تثبیت‌شده با ۳٪ آهک و نانوآهک، (الف) تنش برشی-کرنش افقی، (ب) کرنش قائم-کرنش افقی



شکل (٥): پوش گسیختگی برای ماسهٔ طبیعی و تثبیت‌شده با ۳٪ آهک و نانوآهک

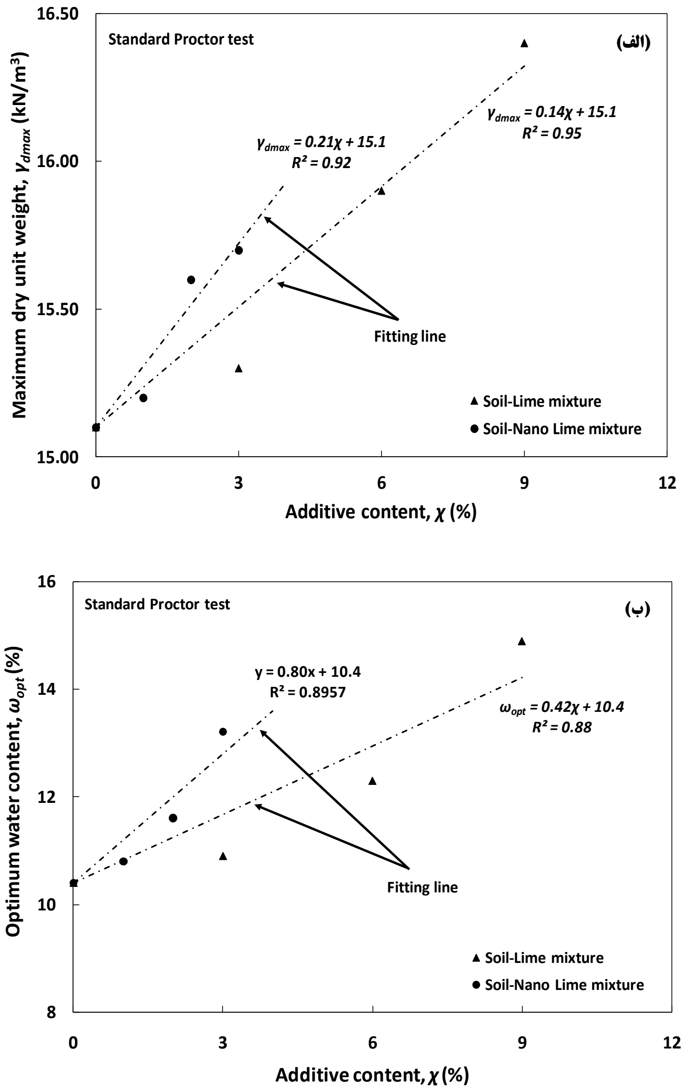
با در نظر گرفتن نقطهٔ حداکثر نمودار تنش-کرنش به‌عنوان نقطه گسیختگی، می‌توان پوش گسیختگی برای خاک را رسم نمود (شکل ٥). بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، افزایش مقاومت برشی نمونه‌های تثبیت‌شده، هم به‌صورت افزایش زاویهٔ اصطکاک بین دانه‌ها و هم افزایش چسبندگی بین ذرات است. با افزودن ۳٪ آهک و نانوآهک، مقدار زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک از ٣٦/٥ درجه در حالت طبیعی، به ٣٦/٩ و ٤١ درجه رسیده است. این در حالی است که تأثیر مواد افزودنی بر چسبندگی شدیدتر بوده و مقدار چسبندگی ماسه ساحلی چالوس از ۲ کیلوپاسکال، به ۱۰ و ۲۷ کیلوپاسکال در حالت استفاده از ۳٪ آهک و نانوآهک افزایش یافته است.

بحث و مقایسه

نمودار تغییرات وزن مخصوص خشک حداکثر و رطوبت بهینه در نمونه‌های با درصدهای مختلف آهک و نانوآهک در شکل (٦) نشان داده شده است. همان‌گونه که مشخص است، افزایش درصد مواد افزودنی (آهک و نانوآهک) باعث افزایش خطی وزن مخصوص خشک حداکثر و درصد رطوبت بهینه می‌گردد. لیکن تأثیر کربنات کلسیم در مقیاس نانو، بیشتر از ابعاد معمولی است و شیب خط مربوط به خاک تثبیت‌شده با نانوآهک بیشتر است.

شکل (٦-الف) نشان می‌دهد که با افزودن ۳٪ نانوآهک به خاک ماسه‌ای، مقدار وزن مخصوص خشک حداکثر نسبت به حالت بدون مواد افزودنی، حدود ٤٪ افزایش می‌یابد. این در حالی است که مقدار افزایش این پارامتر در مخلوط خاک تثبیت‌شده با ۳٪ آهک، حدود ۱/۳٪ است. این موضوع نشان می‌دهد که اضافه کردن کربنات کلسیم در ابعاد نانو، باعث تسریع و تشدید فرآیندهای هیدراتاسیون شده و درنتیجه بازدهی عملیات تراکم در خاک افزایش پیدا می‌کند. با توجّه به شکل (٦-ب) می‌توان متوجّه شد که افزودن آهک و نانوآهک به‌شدّت بر روی رطوبت بهینهٔ مخلوط تأثیرگذار است. درصد افزایش رطوبت بهینه در حالات استفاده از ۳٪ آهک و نانوآهک به ترتیب ٤/٨٪ و ٢٦/٩٪ بوده و شیب تغییرات درصد رطوبت بهینه در مخلوط ماسه و نانوآهک حدود ۱/۹ برابر شیب تغییرات در مخلوط ماسه و آهک است. ذرات آهک و نانوآهک باعث تغییر ساختاری در مخلوط خاک-افزودنی می‌شوند، بدین معنی که در منافذ موجود در خاک قرار گرفته و آب بین‌دانه‌ای را جذب می‌کنند. همچنین ذرات نانوآهک به علّت بار یونی بالا (با توجّه به سطح ویژه بسیار زیاد)، یون‌های هیدراته آب را بیشتر جذب می‌کنند. علاوه بر این، با اضافه نمودن آهک و نانوآهک به خاک ماسه‌ای، به دلیل افزایش واکنش‌های

آنی (تبادل کاتیونی) میان ذرات افزودنی و خاک، لخته شدن ذرات نیز افزایش می‌یابد. بروز این ذرات لخته‌شده (کلوخه‌شده)، باعث سخت‌تر شدن عمل تراکم شده و همین امر باعث شده است که افزودن آهک و نانوآهک تأثیر قابل توجّهی بر میزان وزن مخصوص خاک نداشته باشد. وجود کلوخه‌ها موجب می‌شود که ذرات خاک برای جابه‌جایی خود بر روی یکدیگر با مقاومت بیشتری مواجه شده و درنتیجه به آب بیشتری احتیاج داشته باشند. همچنین انجام هیدراتاسیون و واکنش‌های پوزولانی در مخلوط ماسه با آهک و نانوآهک نیاز به آب دارد، لذا مقداری از آب اضافه‌شده به مخلوط سبب انجام واکنش‌های شیمیایی مذکور می‌گردد. با توجّه به دلایل یاد شده، میزان رطوبت لازم برای ایجاد حداکثر تراکم مخلوط‌های تثبیت‌شده افزایش می‌یابد. افزایش درصد رطوبت بهینه در مخلوط‌های خاک با مواد افزودنی همچون آهک و پوزولان در مطالعات پیشین نیز گزارش شده است [30–۳۲].

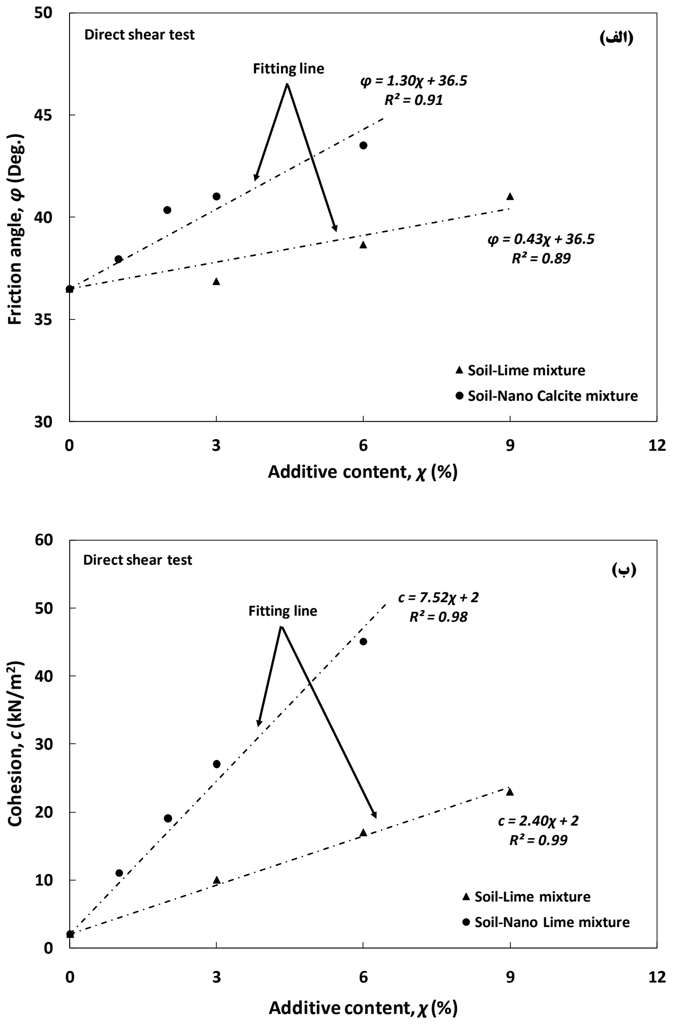


شکل (٦): (الف) تأثیر درصد افزودنی بر وزن مخصوص خشک حداکثر و (ب) تأثیر درصد افزودنی بر درصد رطوبت بهینه

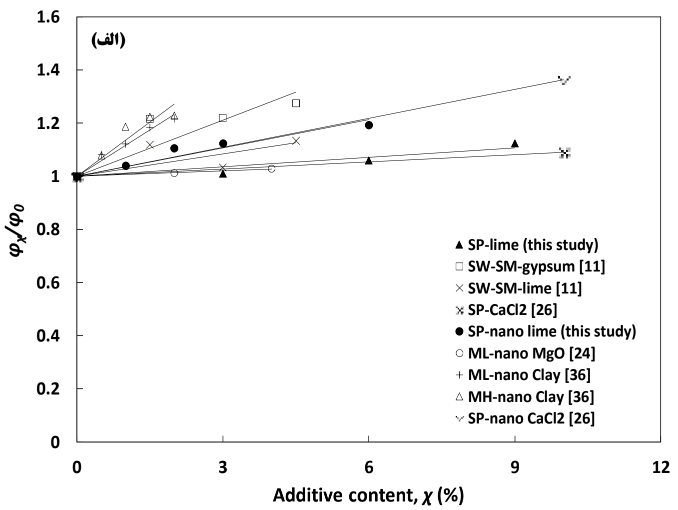
در شکل (۷) تغییرات مقادیر زاویۀ اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک نسبت به درصد وزنی مواد افزوده‌شده به خاک، نمایش داده شده است. همان‌گونه که پیش‌تر بیان گردید، افزودن آهک و نانوآهک به ماسۀ ساحلی چالوس باعث افزایش مقاومت برشی شده است. درواقع وقوع واکنش‌های شیمیایی از جمله سیمانتاسیون و واکنش‌های پوزولانی، در اثر وجود کربنات کلسیم، باعث چسبیدن برخی از دانه‌ها به یکدیگر (کلوخه‌شدن) و درنتیجه تشکیل دانه‌های بزرگ‌تر با سطوح خشن‌تر و گوشه‌دارتر نسبت به خاک اوّلیه می‌شود. همچنین بررسی تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM)، در پژوهش‌های پیشین نشان داده است که تجمع مواد تثبیت‌کننده به دور ذرات خاک، باعث افزایش ناصافی دانه‌ها شده و درنتیجه زاویۀ اصطکاک افزایش می‌یابد. وجود ذرات در ابعاد نانو در فضای بین دانه‌های خاک، باعث افزایش تراکم و انتقال بهتر تنش‌های وارده شده که این امر منجر به افزایش سختی مخلوط‌های تثبیت‌شده با نانومواد می‌گردد [23,27]. با اضافه شدن کربنات کلسیم چه در ابعاد معمولی و چه در ابعاد نانو به خاک، یون‌های Ca^{++} و $2(OH)^{-}$ تجزیه شده، ژل‌های سیمانی سیلیکات هیدراته شده را به وجود می‌آورند. این ژل‌های سیمان‌گونه در بین خلل و فرج خاک نفوذ کرده و چسبندگی بین ذرات خاک را افزایش می‌دهند. از طرف دیگر به دلیل وجود ذرات بسیار ریز در نانوآهک، pH خاک افزایش یافته و سرعت واکنش پوزولانی زیادتر می‌شود و همین امر سبب می‌گردد که تأثیر افزودن نانوآهک بر افزایش مقاومت برشی خاک، بیشتر از افزودن آهک باشد. شیب تغییرات زاویۀ اصطکاک در مخلوط‌های ماسه و نانوآهک، حدود ۳ برابر شیب تغییرات زاویۀ اصطکاک در مخلوط‌های ماسه و آهک است، همچنین شیب تغییرات چسبندگی در حالت استفاده از نانوآهک، حدود ۳/۱۳ برابر این پارامتر در حالت استفاده از آهک است. تأثیر مواد افزودنی در ابعاد نانو بر شدت واکنش‌های پوزولانی در مطالعات پیشین نیز گزارش شده است [33-35].

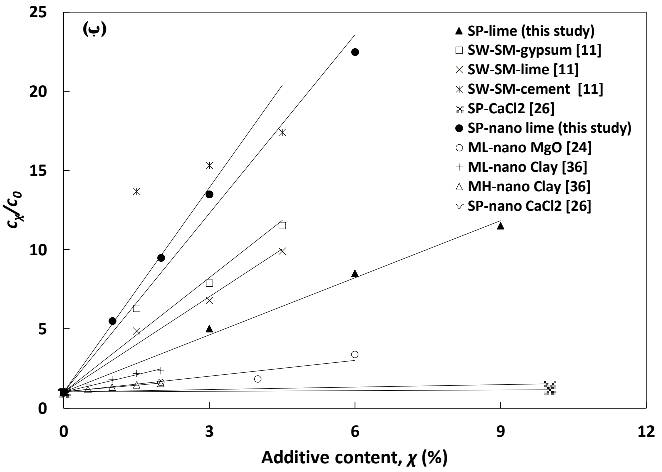
مقایسۀ اَشکال (۷–الف و ب) نشان می‌دهد که تغییرات چسبندگی خاک در اثر تثبیت با آهک و نانوآهک بیشتر از تغییرات زاویۀ اصطکاک داخلی خاک است. افزودن ٦٪ آهک به خاک چالوس باعث می‌شود زاویۀ اصطکاک ۱/۰٦ و چسبندگی ۸/۵ برابر گردد. همچنین در حالت استفاده از ٦٪ نانوآهک، زاویۀ اصطکاک و چسبندگی به ترتیب ۱/۱۹ و ۲۲/۵ برابر افزایش یافته است. ازاین‌رو می‌توان عامل اصلی افزایش مقاومت برشی را چسبندگی مخلوط دانست که پیش‌تر توسط محققین مختلف نیز گزارش شده است [12,24]. در این میان تأثیر نانوآهک در افزایش چسبندگی مخلوط به‌مراتب بیشتر از آهک است.

مقایسه‌ای بین نتایج به‌دست‌آمده از این مطالعه و پژوهش‌های مشابه قبلی انجام گرفته است. شایان یادآوری است که داده‌های گردآوری‌شده مربوط به خاک‌های غیر چسبنده (ماسه و لای) بوده و در آنها از انواع مختلف مواد افزودنی شامل آهک (در ابعاد طبیعی و نانو)، گچ، سیمان، کلریدکلسیم (در ابعاد طبیعی و نانو)، نانواکسید منیزیم و نانورس استفاده شده است. محور قائم در شکل (۸) نسبت مقدار φ یا c در مخلوط با χ درصد افزودنی به مقدار پارامتر در خاک بدون افزودنی است. همان‌گونه که مشخص است، تأثیر مواد افزودنی (در ابعاد طبیعی و نانو) بر روی چسبندگی خاک‌های غیر چسبنده بیشتر از زاویۀ اصطکاک است. درحالی‌که حداکثر نسبت افزایش زاویۀ اصطکاک ۱/٤ است، مقدار چسبندگی در برخی موارد بیش از ۱۰ برابر افزایش یافته است. البته لازم به یادآوری است که مقدار افزایش مقاومت برشی خاک‌های تثبیت‌شده، به‌شدّت به نوع خاک و نوع افزودنی وابسته بوده و پراکندگی زیادی در داده‌ها دیده می‌شود.



شکل (۷): (الف) تأثیر درصد افزودنی بر زاویهٔ اصطکاک داخلی و (ب) تأثیر درصد افزودنی بر چسبندگی





شکل (۸): مقایسهٔ نتایج به‌دست‌آمده با مطالعات پیشین (الف) تأثیر درصد افزودنی بر درصد تغییرات زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک، (ب) تأثیر درصد افزودنی بر درصد تغییرات چسبندگی

نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر اثر تثبیت‌کنندهٔ کربنات کلسیم (آهک) در ابعاد معمولی و نانو بر خواص تراکمی و مقاومتی خاک ماسه‌ای شهرستان چالوس مورد مطالعه قرار گرفت. آزمایش برش مستقیم و پروکتور استاندارد بر روی نمونه‌های مختلف به‌منظور بررسی نقش بهسازی بر رفتار خاک ساحلی انجام گردید. با توجّه به درصدهای افزودنی و ویژگی‌های شیمیایی تقریباً یکسان آهک و نانوآهک، مقایسهٔ کمّی تأثیر ابعاد ذرات افزودنی بر بهسازی ماسهٔ ساحلی چالوس انجام گرفت. برخی از مهم‌ترین یافته‌های این پژوهش در زیر آورده شده است:

۱. به‌طورکلّی بهسازی ماسهٔ ساحلی چالوس به روش تثبیت با آهک و نانوآهک، باعث بهبود ویژگی‌های تراکمی (افزایش وزن مخصوص خشک حداکثر) و پارامترهای مقاومتی (افزایش زاویهٔ اصطکاک داخلی و چسبندگی) خاک می‌گردد؛

۲. با افزودن ۳٪ آهک و نانوآهک به خاک ماسه‌ای، مقدار وزن مخصوص خشک حداکثر نسبت به حالت بدون مواد افزودنی به ترتیب حدود ۱/۳٪ و ٤٪ افزایش می‌یابد. این موضوع نشان‌دهنده تأثیر بیشتر نانوآهک در تسریع و تشدید فرآیندهای هیدراتاسیون و درنتیجه افزایش بازدهی عملیات تراکم در خاک است. بروز واکنش‌های شیمیایی و کلوخه‌شدن دانه‌های خاک، باعث سخت‌تر شدن عملیات تراکم شده، به همین دلیل افزایش وزن مخصوص چندان زیاد نبوده است. لازم به یادآوری است که برای حصول وزن مخصوص حداکثر، مقدار آب بیشتری در خاک‌های تثبیت‌شده مورد نیاز است و این موضوع باید در پروژه‌های اجرایی مدنظر قرار گیرد. به‌عنوان‌مثال رطوبت بهینه در حالت افزودن ۳٪ نانوآهک، به میزان ۲۷٪ افزایش می‌یابد؛

۳. وقوع واکنش‌های شیمیایی از قبیل هیدراتاسیون، سیمانتاسیون و واکنش‌های پوزولانی، باعث فرآیند آگلومراسیون و درنتیجه تشکیل دانه‌های بزرگ‌تر با سطوح خشن‌تر و گوشه‌دارتر نسبت به خاک اوّلیه می‌شود. به همین دلیل زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک افزایش می‌یابد؛

٤. عامل اصلی افزایش مقاومت خاک در اثر تثبیت با آهک و نانوآهک، افزایش چسبندگی ذرات

خاک است. ژل‌های سیمانی سیلیکات هیدراته شده در خلل و فرج خاک نفوذ کرده و باعث افزایش چسبندگی بین ذرات خاک می‌گردد. این موضوع در مخلوط خاک و نانوآهک به‌مراتب چشمگیرتر است. فعّال‌تر بودن نانوآهک در واکنش‌های شیمیایی و ریزی دانه-ها سبب می‌شود که این مواد به‌خوبی دور دانه-های خاک را احاطه کرده و به‌شدّت چسبندگی مخلوط را افزایش دهند.

مراجع

1. Dermatas, D. and Meng, X.G.,"Utilization of fly ash for stabilization/solidification of heavy metalcontaminated soils",*Engineering Geology*, Vol..70, pp. 377-394, (2003).
2. Kalkan, E. and Akbulut, S.,"The positive effects of silica fume on the permeability, swelling, pressure and compressive strength of natural clay liners",*Engineering geology*, Vol.73, No.1: pp. 145-156, (2004).
3. Obrer, C.,"Permeability of stabilized clay", M.Sc. Thesis, Helsinki university of technology, (2006).
4. Gallagher, P.M. and Lin, Y.,"Column testing to determine colloidal silica transport mechanisms", *Geo-Frontiers Congress*, Austin, Texas, United States, (2005).
5. Ahmadi, H., Eslami, A., and Arabani, M.,"Characterization of sedimentary Anzali Sand for static and seismic studies purposes",*International Journal of Geography and Geology*, Vol.4, No.10., pp.155–169, (2015).
6. Zeng, Q.J., Mo, H.H., Liao, J.C., and Pan, H.,"Study on corrosion resistance of soil-cementmixed with nanometer silica powder",*Science Technology and Engineering*, Vol. 7, No. 2, pp.1671–815, (2007).
7. Wang, L.F.,"Experimental researches on microstructure of nanometer silicon and cement-stabilized soils",*Applied Mechanics and Materials*, 94–96:358–64, (2011).
8. Zhang, M.H., and Islam, J.,"Use of nano-silica to reduce setting time and increase earlystrength of concretes with high volumes of fly ash or slag",*Construction and BuildingMaterials*, Vol. 29:, pp.573–80, (2012).
9. Oltulu, M., and Şahin. R.,"Pore structure analysis of hardenedcement mortars containing silica",*Construction and BuildingMaterials*, Vol.53: pp.658–664, (2014).
10. Sadrjamali, M., Athar, S.M., and Negahdar, A.,"Modifying soil shear strength parameters using additives in laboratory condition",*Current World Environment*, Vol.10, No.1, pp.120-130, (2015).
11. Haeri, S.M., Hamidi, A., Hosseini, S.M., Asghari, E., and Toll, D.G.,"Effect of cement type on the mechanical behavior of a gravely sand", *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 24, No.2, pp.335-360, (2006).
12. Asghari, E., Toll, D.G., and Haeri, S.M., "Triaxialbehaviour of a cemented gravely sand, Tehran alluvium", *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 21, No.1, pp.1-28, (2003).

13. Yonekura, R., and Miwa, M.,"Fundamental properties of sodium silicate based grout", *Proceedings of the Southest Asian Geotechnical Conference (SEAGC)*, P.44-439, (1993).
14. Noll, M.R., Bartlett, C., and Dochat, T.M.,"Insitu permeability reduction and chemical fixation using colloidal silica",*National Outdoor Action Conference*, Las Vegas, NV, P.57-443, (1992).
15. Butron, C., Axelsson, M., and Gustafson, G.,"Silica soil for rock grouting laboratory testing of strength, fracture behavior and hydraulic conductivity",*Journal of Tunneling and Underground Space Technology*, Vol. 24, No. 6, pp.603-607, (2006).

۱۶. شوش پا شا،عی سی،عبا سی،مجتبی ونجف نیا،هادی،"برر سی اثر ترکیب سیمان و نانو سیلیس بر روی مقاومت بر شی خاک ما سه ای بابلسر"،نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۰، شماره ۱، صفحه ۱۷۹–۱۸۸، (۱۳۹۷).

17. Bahmani, S.H., Huat, B.B.K., and Asadi, A., and Farzadnia, N.,"Stabilization of residual soil using SiO_2 nanoparticles and cement",*Construction and BuildingMaterials*, Vol.64, pp.350–359, (2014).
18. Kutanaei, S.S., and Choobbasti, A.J.,"Prediction of combined effects of fibers and cement on the mechanical properties of sand using particle swarm optimization algorithm",*Journal of Adhesion Science and Technology*, Vol. 29, No.6, 487–501, (2015).
19. Kutanaei, S.S., and Choobbasti, A.J.,"Experimental study of combined effects of fibers and nanosilica on mechanical properties of cemented sand", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol.28, No. 6:, p. 06016001, (2016).

۲۰. محمدزاده ثانی،ابوالفضل،عربانی،مهیار،خداپر ست حقی،اکبر و جمشیدی چناری،ر ضا،"تأثیر نانو رس بر روی خصو صیات ژئوتکنیکی ماسه های رس دار"، چهارمین همایش بین المللی مهندسی ژئوتکنیک و مکانیک خاک ایران، تهران، (۱۳۸۹).

۲۱. عبدی نژادنوحدانی، امیرحسین، عسکری جیرهنده، صادق، ترابی خداشهری، حامد و احتشامی، امیرمحمد،"ارزیابی آزمایشگاهی بهسازی خاک رس با نانوآهک و آهک به منظور بهبود خواص خمیری رس"، کنفرانس بین المللی پژوهش های نوین در عمران، معماری و شهرسازی، تهران، شرکت مدیران ایده (۱۳۹۴).

22. Zhang, G., Germaine, J.T., Whittle, A.J., and Ladd, C.,"Index properties of a highly weathered old alluvium", *Geotechnique*, Vol.54, NO. 7, pp. 441-451, (2004).
23. Gao, L., Ren, K., Ren, Z., and Yu, X.,"Experimental study of nanometer magnesium oxide-modified clay",*Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol..52, NO. 4,: pp.218–224, (2015).
24. Gao, L., Ren, K., Ren, Z., and Yu, X.,"Study on the shear property of nano-mgo-modified soil",*Marine Georesources & Geotechnology*, Vol. 36, pp. 465–470, (2018).
25. García, S., Trejo, P., Ramírez, O., López-Molina, J., and Hernández,N., "Influence of nanosilica on compressive strength of lacustrine soft clays",*Proceedings of the 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Seoul, Korea, pp. 369–372, (2017).
26. Taipodia, J., Dutta, J., and Dey, A.K., "Effect of nanoparticles on properties of soil",*Proceedings of Indian Geotechnical Conference*, Kochi, (2011).

27. Ahmadi, H.,"Experimental study of the effect of nano-additives on the stiffness of cemented fine sand",*International Journal of Geotechnical Engineering*, pp.1-14, (2019).
28. ASTM D698,"Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort (12,400 ft-lbf/ft3 (600 kN-m/m3))", ASTM International, West Conshohocken, PA, (2011).
29. ASTM D3080,"Standard test method for direct shear test of soils underconsolidated drained conditions", ASTM International, West Conshohocken, PA, (2011).
30. Bahadori, H., Hasheminezhad,A.,and Taghizadeh,F.,"Experimental study on marl soil stabilization using natural pozzolans",*Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol..31, No..2, pp.04018363, (2019).
31. Bahadori, H., Hasheminezhad, A., and Alizadeh, S.,"The influence of natural pozzolans structure on marl soil stabilization",*Transportation Infrastructure Geotechnology*, Vol. 7: pp.46-54, (2020).
۳۲. نوروززاده، پیام و فرخی، فرهنگ،"تأثیر نانورس بر روی خصوصیات تراکمی و مقاومت فشاری خاک ماسه رس-دار تثبیت‌شده با آهک"، کنفرانس عمران، معماری و شهرسازی کشورهای جهان اسلام، تبریز، دانشگاه تبریز-دانشگاه شهید مدنی آذربایجان-دانشگاه علمی کاربردی شهرداری تبریز، (۱۳۹۷).
33. Qing, Y., Zenan, Z., Deyu, K., and Rongshen,C., "Influence of nano-SiO_2 addition on properties of hardened cement paste as compared with silica fume", *Construction and Building Materials*, Vol. 21: pp.539–545, (2007).
34. Papatzani, S., Paine, K., and Calabria-Holley, J.,"A comprehensivereview of the models on the nanostructure of calcium silicatehydrates",*Construction and Building Materials*, Vol.74: pp.219–234, (2015).
35. Oltulu, M., and Şahin. R.,"Single and combined effects ofnano-SiO_2, nano-Al_2O_3 and nano-Fe2O3 powders on compressivestrength and capillary permeability of cement mortar containingsilica fume", *Materials Science and Engineering*, A 528: pp.7012–7019, (2011).
36. Bahari, M., Nikookar, M., Arabani, M., Haghi, A.K., and Khodabandeh, H., "Stabilization of silt by nano-clay", *7th National Congress on Civil Engineering*, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran. (2017).